

육성기 참돔(*Pagrus major*) 사료내 어분대체원으로서 동애등에(*Hermetia illucens*) 분 대체율 평가

김현종 · 정성목 · 배진호 · 김강웅 · 허상우*

국립수산과학원 사료연구센터

Evaluation of Black Soldier Fly *Hermetia illucens* Meal as a Fish Meal Replacement for Growing Red Seabream *Pagrus major*

Hyeon Jong Kim, Seong-Mok Jeong, Jin-Ho Bae, Kang-Woong Kim and Sang-Woo Hur*

Aquafeed Research Center, National Institute of Fisheries Science, Pohang 37517, Republic of Korea

This study evaluated the effects of defatted and non-defatted black soldier fly meal (BSFM) as a fish meal replacement in growing red seabream. Four isonitrogenous and isolipidic diets were formulated: 0% BSFM (D1), 5% defatted BSFM (D2), 5% non-defatted BSFM (D3), and 5% defatted + non-defatted BSFM (1:1, D4). A total of 360 growing red seabreams (mean \pm SD body weight, 98.9 \pm 0.29 g) were equally distributed into 12 circular polyethylene tanks (1,000 L; 30 fish per tank; $N=3$ tanks per treatment). The red seabream were fed until satiation twice daily for 12 weeks. After 12 weeks, growth, feed utilization, whole-body proximate composition, blood parameters, and immune related parameters were measured. No significant differences were observed in weight gain, specific growth rate, feed conversion ratio, morphological parameters, plasma metabolites, plasma lysozyme, glutathione peroxidase, and superoxide dismutase among the experimental groups. However, immunoglobulin M (IgM) in fish fed D2 and D3 were significantly higher than those in fish fed D1. Additionally, the fish in D2 group showed higher IgM levels than those in the other treatment groups. These results indicate that defatted and non-defatted BSFM could be utilized as a potential feed ingredient for fishmeal replacement for red seabream.

Keywords: Red seabream, Black soldier fly, Replacing fish meal, Immune enhancement

서론

전 세계적으로 최근 어류 양식산업의 규모가 증가하고 있으며, 현재 소비되는 어류의 절반 이상이 양식을 통해 공급되고 있다(FAO, 2021). 양식산업 시장 규모가 매년 증가함에 따라 어류 생산을 위한 사료 원료 확보와 안정적인 사료 생산이 전 세계적인 추세가 되었다. 어분은 단백질과 아미노산 및 필수 지방산이 풍부하여 사료내 단백질 비중이 높은 해산어 배합사료의 주요 단백질원으로 사용된다(Lim et al., 2022). 그러나 최근 기후변화와 어획량 감소 및 어분의 수요증가로 인한 공급의 불안정과 같은 문제가 발생하고 있으며(Abdul-Halim et al., 2014; Hua et al., 2019), 양식생산 단가의 매우 높은 비중을 차지하고 있는 배합사료의 주요 원료인 어분에 대한 대체원료의 개발이

요구된다. 양어사료의 주요 단백질 원료인 어분을 대체하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 현재 다양한 동·식물성 대체원료가 탐색 및 개발되어 사용되고 있다(Gatlin et al., 2007).

최근 어분의 대체원료로 동애등에 이용성에 대한 연구가 세계적으로 활발히 진행되고 있다. 동애등에는 남은 음식물을 먹이원으로 이용하여 생산이 가능한 친환경 원료이며, 생활사 주기가 짧고 대량생산 시스템에서 안정적인 생산이 가능하다. 따라서 다른 곤충소재 보다도 낮은 가격으로 생산, 공급이 가능하여 사료적 가치가 우수하다. 또한 동애등에는 건조 시 약 50%가 단백질로 구성되어 있기 때문에 어류의 단백질 공급원으로 활용 가치가 높으며(Rothman et al., 2014), 지질의 함량이 높아서 탈지油和 비탈지 원료로 나누어 폭 넓게 적용 가능하다. 또한 기능성 지방산인 lauric acid를 다량 함유하여 항균이나 항산화 기능성

*Corresponding author: Tel: +82. 54. 230. 3630 Fax: +82. 54. 230. 3635

E-mail address: maverickhur@korea.kr



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

<https://doi.org/10.5657/KFAS.2024.0342>

Korean J Fish Aquat Sci 57(4), 342-348, August 2024

Received 31 May 2024; Revised 10 July 2024; Accepted 8 August 2024

저자 직위: 김현종(연구원), 정성목(연구원), 배진호(연구원), 김강웅(연구관), 허상우(연구원)

이 우수하다(Ouattara et al., 1997; Dierick et al., 2002; Choi et al., 2015; Ushakova et al., 2016). 이러한 장점 때문에 현재 많은 양식어종에서 동애등에 유충의 이용성에 관한 연구가 보고되었다(Kroeckel et al., 2012; Li et al., 2017; Magalhães et al., 2017; Xiao et al., 2018; Belghit et al., 2019; Madibana et al., 2020; Jo et al., 2021; Jeoung et al., 2023). 어분대체원으로 사용되는 원료에는 원료의 조성에 따라 각기 다른 가공방법이 존재하며, 많은 가공이 필요한 사료 원료를 사용할 경우 사료내 단백질 수준과 사료 가용성을 향상시킬 수 있는 반면, 가공 단계의 증가로 인한 사료 가격 인상을 초래할 수 있다. 동애등에의 경우 높은 지질을 함유하고 있어 탈지 여부에 따른 추가 공정 비용이 발생할 수 있기 때문에 탈지 및 비탈지 원료로 구분하여 공정별 이용성 평가가 요구된다.

따라서 이 연구는 탈지 및 비탈지 동애등에를 어분 대체원으로 활용하여 육성기 참돔의 성장, 전어체 조성 및 면역 관련 인자에 미치는 영향을 평가하기 위해 수행하였다.

재료 및 방법

실험어 사육 조건

실험어의 사육관리 및 샘플 수집은 국립수산물시험 동물실험 계획(2021-NIFS-IACUC-21)에 따라 국립수산물시험원 사료연구센터에서 수행되었다. 실험에 사용된 참돔은 2주간 8톤 원형수조에 수용하여 순치하였으며, 순치기간동안 1일 2회 시판사료를 공급하였다. 사육실험은 초기 체중 98.94 ± 0.29 g (mean \pm SE)인 육성기 참돔 360마리를 1톤 유수식 원형수조 12개에 각각 30마리씩 무작위 배치하였다. 사육실험은 자연광주기(L12:D12) 및 자연해수 조건으로 진행하였으며 유수량은 각 수조당 15 L/min이었고, 1일에 2회 환수를 실시하여 바닥에 쌓인 찌꺼기를 제거해 주었다. 12주의 사육기간 동안 수온은 $23.6 \pm 2.2^\circ\text{C}$ (mean \pm SE), 용존산소는 9.9 ± 0.8 mg/L (mean \pm SE)의 범위였으며, 사료공급은 1일 2회(09:00, 16:00) 손으로 만복 공급하였다.

실험용 사료의 제조

이 연구에 이용된 사료의 조성표는 Table 1에 나타내었으며, 실험사료에 이용된 탈지 및 비탈지 동애등에분은 (주)CIEF (Gimje, Korea)에서 구매하여 사용하였다. D1 (대조구)은 어분 30%, 참치부산물분 30%를 사료내 주요 단백질원, 어유 3.5%를 주요 지질원으로 사용하였으며, 소맥분 19.18%를 주요 탄수화물원으로 사용하였다. D1 사료내 어분 2.5%와 참치부산물분 2.5%를 탈지 동애등에분 및 비탈지 동애등에분으로 각각 5% 대체한 D2 및 D3, 사료내 어분 2.5%와 참치부산물분 2.5%를 탈지 및 비탈지 동애등에 혼합분(1:1)으로 5% 대체한 D4 실험사료를 제조하였다. 모든 사료 원료와 물은 vertical mixer (HYVM-1214; Hanyoung Corp., Hanam, Korea)를 사용하

여 혼합하였으며, 혼합된 원료들을 펠렛성형기(SP-75; Geumgang ENG, Korea)를 사용하여 제조를 실시하였다. 60°C 전기 건조기(SHI-300; Shinhanil, Gwangju, Korea)에서 2시간 동안 건조 후 -25°C 냉동고에 보관하였다.

어체측정 및 혈액 분석

12주간의 사육실험 종료 후, 생존율, 증체량(weight gain, WG), 일일성장률(specific growth rate, SGR), 사료계수(feed conversion ratio, FCR), 비만도(condition factor, CF), 간중량지수(hepatosomatic index, HSI), 내장중량지수(viscerosomat-

Table 1. Feed ingredients of the experimental diets composition

Ingredients (%)	Experimental diets			
	D1	D2	D3	D4
Fish meal	30	27.5	27.5	27.5
Tuna by-product meal	30	27.5	27.5	27.5
Defatted BSFM	0	5	0	2.5
Non-defatted BSFM	0	0	5	2.5
Wheat gluten	3	4	4.9	4.4
Poultry by-product meal	3	3	3	3
Krill meal	0.5	0.5	0.5	0.5
Soybean meal	8	8	8	8
Wheat flour	19.18	18.13	17.68	17.98
Monocalcium phosphate	0.20	0.20	0.20	0.20
Lecithin	1.00	1.00	1.00	1.00
Choline	0.12	0.12	0.12	0.12
Vitamin C	0.50	0.50	0.50	0.50
Mineral Mix ¹	0.50	0.50	0.50	0.50
Vitamin Mix ²	0.50	0.50	0.50	0.50
Fish oil	3.50	3.55	3.10	3.30
Proximate composition (% DM)				
Moisture	2.81	2.30	2.25	2.24
Crude protein	52.69	52.74	52.02	52.10
Crude lipid	12.49	12.58	12.89	12.84
Crude ash	13.15	13.38	13.70	13.51

¹Mineral premix contained the following ingredients (g/kg premix): NaCl, 43.3; MgSO₄ · 7H₂O, 136.5; NaH₂PO₄ · 2H₂O, 86.9; KH₂PO₄, 239; CaHPO₄, 135.3; Ferric citrate, 29.6; ZnSO₄ · 7H₂O, 21.9; Ca-lactate, 304; CuCl, 0.2; AlCl₃ · 6H₂O, 0.15; KI, 0.15; MnSO₄ · H₂O, 2.0; CoCl₂ · 6H₂O, 1.0. ²Vitamin premix contained the following amount which were diluted in cellulose (g/kg premix): L-ascorbic acid, 121.2; DL- α -tocopheryl acetate, 18.8; thiamin hydrochloride, 2.7; riboflavin, 9.1; pyridoxine hydrochloride, 1.8; niacin, 36.4; Ca-D-pantothenate, 12.7; myo-inositol, 181.8; D-biotin, 0.27; folic acid, 0.68; p-aminobenzoic acid, 18.2; menadione, 1.8; retinyl acetate, 0.73; cholecalciferol, 0.003. BSF, Black soldier fly.

ic index, VSI)를 측정하였다. 각 수조당 10마리의 실험어를 무작위로 선별하여 2-phenoxy-ethanol (Sigma-Aldrich, St. Louis, MO, USA) 용액으로 마취시킨 후, 미병부에서 혈액을 채취하였다. 채취한 혈액은 원심분리기를 이용하여 5,000 rpm으로 10분간 원심분리 후, 혈장(plasma)을 분리한 후 혈액성상 및 면역활성 분석 전까지 초저온 냉동보관(-80°C)하였다. 분리된 혈장으로 AST, total protein, glucose, cholesterol, triglyceride를 분석하였으며 전자동 습식 생화학 분석기(Fully automatic wet chemistry analyzer; Indiko, Waltham, MA, USA)를 이용하여 제조사의 분석 메뉴얼에 따라 진행하였다. 또한 혈중 면역관련인자 및 항산화효소 4종(lysozyme, LZM; immunoglobulin M, IgM; superoxide dismutase; SOD, glutathione peroxidase, GSH-PX)을 ELISA (enzyme-linked immunosorbent assay) kit (ELISA Kits; CUSABIO, Houston, TX, USA)를 사용하여 분석하였다.

실험사료 및 실험어의 일반성분분석

실험어의 이화학적 분석을 위해 각 수조별로 5마리씩 무작위로 샘플하여 냉동보관(-25°C)하였다. 실험에 사용된 모든 실험사료와 전어체 샘플을 각각 균질화 시킨 후, 일반성분분석을 실시하였다. 실험사료와 전어체의 일반성분분석은 AOAC (2005) 방법에 따라 조단백질은 Kjeldahl method (Kjeldahl 8400; FOSS, Hillerød, Denmark)으로 조지질은 에테르추출법 (Soxtec 2043; FOSS)으로 분석하였다. 또한 조회분은 600°C 회화로(FHPX-14; Daihan Scientific Co., Ltd, Daegu, Korea)에서 6시간 동안 회화한 후 정량하였으며, 수분은 135°C Dry oven (OF-W155; Daihan Scientific Co., Ltd)에서 2시간동안 건조시킨 후 측정하였다.

통계 분석

통계적 분석은 IBM SPSS program version 25 (SPSS Inc.,

Chicago, IL, USA)을 이용하여 One-way ANOVA와 Duncan's multiple range test로 각 실험구간의 유의성을 검정하였다. 실험 데이터는 평균±표준편차로 표현하였으며, P<0.05를 유의 수준으로 설정하여 유의성을 판단하였다.

결과 및 고찰

실험사료 원료의 일반성분 분석 결과는 Table 2에 나타내었다. 어분, 참치부산물분, 탈지 동애등에분, 비탈지 동애등에분의 수분, 조단백질, 조지질, 회분의 함량은 각각 3.87–10.05%, 38.99–68.11%, 8.49–33.92% 및 13.59–22.84%의 범위였으며, 어분에서 가장 높은 조단백질 함량을 보였고, 탈지 동애등에에서 가장 높은 회분 함량, 비탈지 동애등에분에서 가장 높은 조지질 함량이 나타났다.

12주간의 사육 실험에 따른 성장 결과를 Table 3에 나타내었다. 참돔의 생존율은 모든 실험구에서 98% 이상이었으며, 참돔의 WG, SGR, FCR는 모든 실험구간에 유의적인 차이가 나타나지 않았다(P>0.05). 또한 참돔의 CF, VSI 및 HSI 측정결과, 모든 실험구간에 유의적인 차이가 나타나지 않았다(P>0.05). 이 연구와 유사하게, Takakuwa et al. (2022)의 연구에 따르면 탈지 동애등에분으로 참돔 치어용(초기무게, 17.9 g) 배합

Table 2. Proximate composition (%) of fish meal, defatted and non-defatted black soldier fly *Hermetia illucens* meal used in this study

	Moisture (%)	Crude protein (%)	Crude lipid (%)	Ash (%)
Fish meal	10.05	68.11	9.74	13.59
Tuna by-product meal	2.74	61.65	9.31	22.07
Defatted BSFM	5.65	52.41	8.49	22.84
Non-defatted BSFM	3.87	38.99	33.92	16.45

BSFM, Black soldier fly *Hermetia illucens* meal.

Table 3. Growth performance of red seabream *Pagrus major* fed the test diets for 12 weeks

	D1	D2	D3	D4
Growth performance				
Final body weight (g/fish)	268.7±6.72	274.4±7.39	272.9±4.10	274.0±7.95
Weight gain (%)	171.7±6.32	177.5±7.83	175.7±4.12	177.1±8.32
Specific growth rate (%/day)	1.19±0.03	1.21±0.03	1.21±0.02	1.21±0.04
Feed conversion ratio	2.2±0.11	2.2±0.31	2.1±0.05	2.1±0.12
Survival (%)	100±0.00	98.9±1.92	100±0.00	98.9±1.92
Morphological parameters				
CF	1.76±0.03	1.80±0.08	1.73±0.02	1.78±0.08
VSI	6.43±0.01	6.86±0.06	6.49±0.15	6.82±0.22
HSI	1.35±0.50	1.32±0.30	1.21±0.32	1.4±0.22

CF, Condition factor; VSI, Viscerosomatic index; HSI, Hepatosomatic index. Values (N=3 tanks per treatment) in the same row sharing the same superscript letter are not significantly different (P>0.05).

사료내 어분의 41.7% (사료내 28.13%)까지 대체 가능하다고 보고하였으며, 탈지 동애등에분의 어분대체에 따른 참돔의 CF와 HSI는 영향을 받지 않았으나 VSI는 배합사료내 탈지 동애등에분의 어분대체 함량이 증가할수록 감소하는 경향을 보였다. 또한, gilthead seabream *Sparus aurata* (초기무게, 181.6 g) 사료내 어분을 탈지 동애등에분으로 대체하였을 때 사료내 어분의 50%(사료내 18.4%)까지 대체가 가능하였으며, gilthead seabream의 CF, VSI 및 HSI는 탈지 동애등에분의 어분 대체에 따른 영향이 나타나지 않았다(Gai et al., 2023).

치어기 넙치(*Paralichthys olivaceus*) 배합사료내 어분을 비탈지 동애등에분으로 22.2% (사료내 10%) 대체 가능하였으며, 넙치의 CF, VSI 및 HSI는 비탈지 동애등에분의 첨가에 따른 차이가 나타나지 않았다(Song et al., 2023). 또한 시베리아 철갑상어(*Acipenser baerii*) 배합사료내 비탈지 동애등에분을 30% 함유시 성장 및 사료이용성이 증가하였으며, 어분 및 어유의 함량을 각각 61.3% 및 95.4%까지 대체가 가능하였다(Rawski et al., 2020). 이 연구에서는 육성기용 참돔 배합사료 내 어분 대체원으로써 탈지 및 비탈지 동애등에분으로 8.3% (사료내 5%)까지 대체하여도 성장 및 사료효율에서 D1 실험구와 유의적인 차이는 나타나지 않았으나 더 높은 성장 결과가 나타났다. 이러한 결과를 고려하였을 때, 참돔 육성기 사료내 어분대체원으로서 탈지 및 비탈지 동애등에분의 더 높은 함량으로 대체가 가능할 것으로 사료된다.

사육실험 종료 후 실험어의 등근육 일반성분 분석 결과를 Table 4에 나타내었다. 등근육의 수분, 조단백질 및 조지질에서는 각 실험구간 유의적 차이가 나타나지 않았다($P>0.05$). 조회분 함량에서 비탈지 동애등에분이 함유된 실험구(D3 및 D4)가 D1에 비해 높은 수치를 나타냈으며, 탈지 동애등에분이 함유된 D2 실험구와는 유의적인 차이가 나타나지 않았다. 이 연

구와 유사하게, 참돔 치어용 배합사료내 어분을 함량별 탈지 동애등에분으로 대체하였을 때 전어체 일반성분 분석 결과는 모든 실험구간에 영향을 받지 않았으며(Takakuwa et al., 2022), gilthead seabream 사료내 어분을 탈지 동애등에분으로 대체하였을 때, 모든 실험구의 전어체 함량은 탈지 동애등에분의 어분 대체율에 영향을 받지 않았다(Gai et al., 2023).

사육실험 종료 후 실험어의 혈액분석 결과를 Table 5에 나타내었다. 혈액분석결과 AST, triglyceride, cholesterol, glucose, total protein에서 실험구간 유의적인 차이는 나타나지 않았다($P>0.05$). 어류의 혈액학적 분석은 어류의 건강상태를 평가하고 질병 진단 및 환경변화에 대한 반응을 모니터링 하는데 이용된다(Clauss et al., 2008). 이 연구와 유사하게 무지개송어(*Oncorhynchus mykiss*) 배합사료내 어분을 탈지 동애등에분으로 대체하였을 때 무지개 송어의 cholesterol, glucose, total protein은 실험구간에 유의적인 차이가 나타나지 않았으며(Dumas et al., 2018), 넙치 치어용 배합사료내 어분을 비탈지 동애등에분으로 10% 대체하였을 때 AST 및 Cholesterol은 비탈지 동애등에분의 어분 대체에 따른 영향을 받지 않았다(Song et al., 2023).

사육실험 종료 후 실험어의 면역분석 결과를 Fig. 1에 나타내었다. SOD, lysozyme 및 GSH-PX는 실험구간에 유의적인 차이는 나타나지 않았으나($P>0.05$), IgM은 D2와 D3실험구에서 D1에 비해 유의적으로 높았다($P<0.05$). IgM은 포유류와 마찬가지로 어류에서 면역 체계에 중요한 역할을 하며, 어류는 해양과 담수 환경에서 다양한 병원체에 노출되기 때문에 IgM은 초기 병원체에 노출되었을 때 가장 먼저 생성되는 항체로써 신속하게 병원체의 용해 및 제거를 촉진한다(Mashoof and Crisciello, 2016).

Kishawy et al. (2022)의 연구 결과에 따르면, 나일틸라피아

Table 4. Muscle nutrients composition of red seabream *Pagrus major* fed for 12 weeks

	D1	D2	D3	D4
Moisture (%)	75.12±0.41	74.54±0.0.09	74.63±0.42	74.32±0.35
Crude protein (%)	21.81±0.39	22.21±0.33	21.95±0.10	21.75±0.26
Crude lipid (%)	1.15±0.16	1.29±0.20	1.34±0.35	1.58±0.28
Ash (%)	1.57±0.05 ^b	1.66±0.02 ^{ab}	1.58±0.28 ^a	1.76±0.04 ^a

Values (N= 3 tanks per treatment) in the same row sharing the same superscript letter are not significantly different ($P>0.05$).

Table 5. Plasma metabolites of red seabream *Pagrus major* fed for 12 weeks

	D1	D2	D3	D4
AST (U l ⁻¹)	38.51±5.19	41.16±5.34	34.25±4.04	39.32±2.96
Triglycerides (mg dl ⁻¹)	102.15±3.96	114.23±11.79	94.23±22.19	127.12±12.27
Cholesterol (mg dl ⁻¹)	181.35±20.71	183.31±2.23	195.27±25.26	189.48±14.47
Glucose (mmol l ⁻¹)	95.98±23.49	78.41±10.82	82.75±20.30	77.97±22.54
Total proteins (g dl ⁻¹)	3.81±0.26	3.94±0.13	3.73±0.39	3.91±0.14

Values (N=3 tanks per treatment) in the same row sharing the same superscript letter are not significantly different ($P>0.05$).

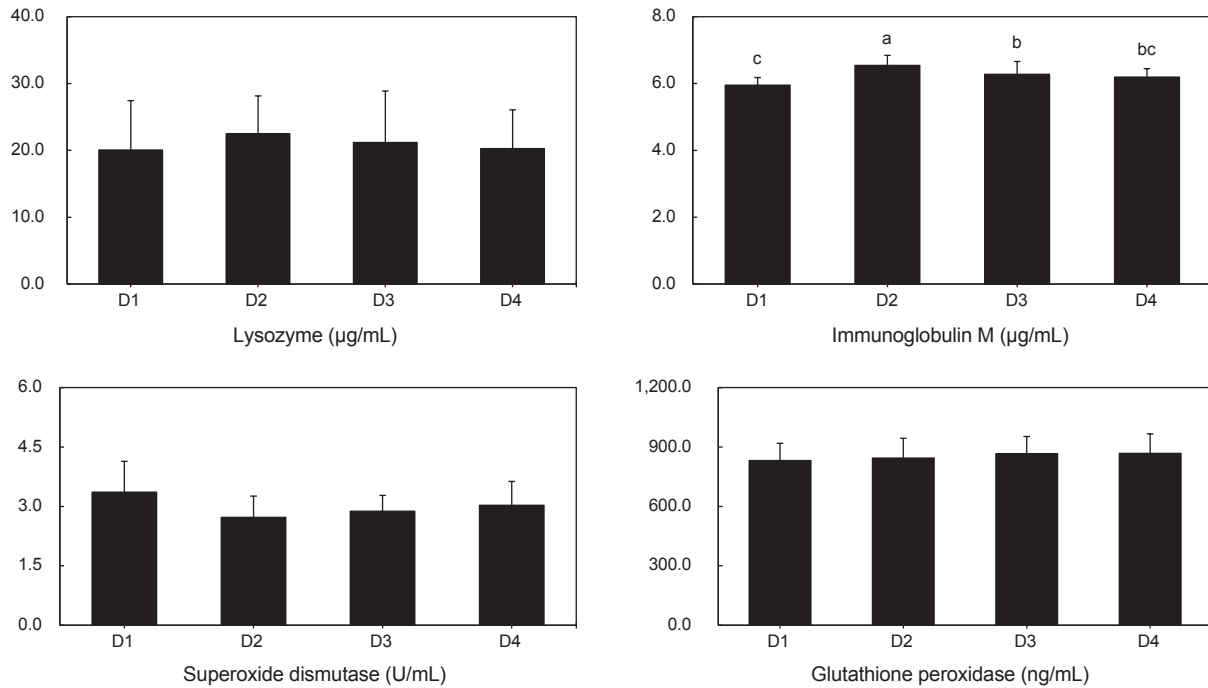


Fig 1. Interaction effect means of plasma LZM, IgM, SOD, and GSH-PX of juvenile red seabream *Pagrus major* fed for 12 weeks. Values are mean of three replicates. Values without superscript letters within the same row in the table are not significantly ($P>0.05$) different. LZM, Lysozyme; IgM, Immunoglobulin M; SOD, Superoxide dismutase; GSH-PX, Glutathione peroxidase.

(*Oreochromis niloticus*) 배합사료내 탈지 동애등에분의 어분 대체 함량이 증가함에 따라 IgM이 유의적으로 증가하였다. 또한, 무지개 송어 배합사료내 어분을 탈지 동애등에분으로 대체 시 IgM이 유의하게 증가하였으며, 탈지 동애등에분으로 어분을 50% 이상 대체시 *Lactococcus petauri*에 감염된 어류의 생존율이 향상되었다(Sayramoğlu et al., 2023).

참돔 배합사료내 어분을 탈지 및 비탈지 동애등에분으로 8.3% (사료내 5%)만 대체하여도 면역활성이 증가하여 사육환경에 따라 달라지는 면역반응에 긍정적인 영향을 미칠 것으로 판단되며, 이는 참돔 육성기용 배합사료내 탈지 및 비탈지 동애등에분이 어분대체원으로써 적합한 것으로 판단된다.

육성기 참돔용 배합사료내 탈지 및 비탈지 동애등에분으로 어분 대체시, 참돔의 성장 및 사료이용성에서 탈지 및 비탈지 동애등에분으로 어분을 대체한 실험구와(D2, D3 및 D4) D1실험구에서 유의적인 차이가 나타나지 않았으며, IgM이 증가하였다. 이러한 결과는, 육성기 참돔 배합사료내 어분대체원으로써 탈지 및 비탈지 동애등에분이 육성기 참돔의 면역향상에 효과적인 것으로 판단되며, 어분대체원으로 이용성이 우수하다고 판단된다. 또한, 친환경 참돔 배합사료 연구에 기초 자료로 활용이 가능하며, 추후 곤충소재 가공 단계별 이용성 평가, 소화활성 및 다양한 함량의 탈지 및 비탈지 동애등에분으로 어분을 대체한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

사 사

이 논문은 국립수산물과학원 수산시험연구소(지속가능한 친환경 배합사료 생산기술 및 품질관리 연구, R2024038)의 지원으로 수행된 연구입니다.

References

- Abdul-Halim HH, Aliyu-Paiko M and Hashim R. 2014. Partial replacement of fish meal with poultry by-product meal in diets for snakehead *Channa striata* (Bloch, 1793), fingerlings. *J World Aquac Soc* 45, 233-241. <https://doi.org/10.1111/jwas.12112>.
- AOAC (Association of Official Analytical Chemists). 2005. Official Methods of Analysis. AOAC, Arlington, VA, U.S.A. <https://doi.org/10.1002/0471740039.vec0284>.
- Belghit I, Liland NS, Gjesdal P, Biancarosa I, Menchetti E, Li Y, Waagbø R, Krogdahl Å and Lock EJ. 2019. Black soldier fly larvae meal can replace fish meal in diets of sea-water phase Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Aquaculture* 503, 609-619. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2018.12.032>.
- Choi HS, Kim SA and Shin HJ. 2015. Present and perspective on insect biotechnology. *KSBB J* 30, 257-267. <https://doi.org/10.7841/ksbbj.2015.30.6.257>.
- Clauss TM, Dove AD and Arnold JE. 2008. Hematologic disorder

- ders of fish. *Vet Clin North Am Exotic Anim Pract* 11, 445-462. <https://doi.org/10.1016/j.cvex.2008.03.007>.
- Dierick NA, Decuypere JA, Molly K, Van Beek E and Vanderbeke E. 2002. The combined use of triacylglycerols containing medium-chain fatty acids (MCFAs) and exogenous lipolytic enzymes as an alternative for nutritional antibiotics in piglet nutrition I. *In vitro* screening of the release of MCFAs from selected fat sources by selected exogenous lipolytic enzymes under simulated pig gastric conditions and their effects on the gut flora of piglets. *Livest Prod Sci* 75, 129-142. [https://doi.org/10.1016/S0301-6226\(01\)00303-7](https://doi.org/10.1016/S0301-6226(01)00303-7).
- Dumas A, Raggi T, Barkhouse J, Lewis E and Weltzien E. 2018. The oil fraction and partially defatted meal of black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*) affect differently growth performance, feed efficiency, nutrient deposition, blood glucose and lipid digestibility of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Aquaculture* 492, 24-34. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2018.03.038>.
- FAO (Food and Agriculture Organization). 2024. Global Aquaculture Production (Online Query). Retrieved from https://www.fao.org/fishery/Statistics-query/en/global_Production/global_Production_quantity on Jul 18, 2024.
- Gai F, Cusimano GM, Maricchiolo G, Caccamo L, Caimi C, Macchi E, Meola M, Perdichizzi A, Tartarisco G and Gasco L. 2023. Defatted black soldier fly meal in diet for grow-out gilthead seabream (*Sparus aurata* L. 1758): Effects on growth performance, gill cortisol level, digestive enzyme activities, and intestinal histological structure. *Aquac Res* 2023, 3465335. <https://doi.org/10.1155/2023/3465335>.
- Gatlin DM, Barrows FT, Brown P, Dabrowski K, Gaylord TG, Hardy RW, Herman E, Hu G, Krogdahl Å, Nelson R, Overturf K, Rust M, Sealey W, Skonberg D, Souza EJ, Stone D, Wilson R and Wurtele E. 2007. Expanding the utilization of sustainable plant products in aquafeeds: A review. *Aquac Res* 38, 551-579. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2007.01704.x>.
- Hua K, Cobcroft JM, Cole A, Condon K, Jerry DR, Mangott A, Praeger C, Vucko MJ, Zeng C, Zenger K and Strugnell JM. 2019. The future of aquatic protein: Implications for protein sources in aquaculture diets. *One Earth* 1, 316-329. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2019.10.018>.
- Jeoung SM, Kim NL, Hur SW, Lee SH, Bae JH and Kim KW. 2023. Effect of dietary inclusion of black soldier fly larvae *Hermetia illucens* meal on growth performance of starry flounder *Platichthys stellatus* and feed value. *Korean J Fish Aquat Sci* 56, 373-379. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2023.0373>.
- Jo SJ, Park SJ, Lee SB, Tran BT, Kim JS, Song JW, Lee BJ, Hur SW, Nam TJ, Lee KJ, Lee SH and Choi YH. 2021. Effect of low-fishmeal diets on some digestive physiological responses of juvenile and growing olive flounder (*Paralichthys olivaceus*) fed at an industrial-scale fish farm. *Aquacult Rep* 21, 100904. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2021.100904>.
- Kishawy AT, Mohammed HA, Zagloul AW, Attia MS, Hassan FA, Roushdy EM, Ismail TA and Ibrahim D. 2022. Partial defatted black soldier larvae meal as a promising strategy to replace fish meal protein in diet for Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*): Performance, expression of protein and fat transporters, and cytokines related genes and economic efficiency. *Aquaculture* 555, 738195. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2022.738195>.
- Kroeckel S, Harjes AGE, Roth I, Katz H, Wuertz S, Susenbeth A and Schulz C. 2012. When a turbot catches a fly: Evaluation of a pre-pupae meal of the black soldier fly (*Hermetia illucens*) as fish meal substitute - growth performance and chitin degradation in juvenile turbot (*Psetta maxima*). *Aquaculture* 364-365, 345-352. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2012.08.041>.
- Li S, Ji H, Zhang B, Zhou J and Yu H. 2017. Defatted black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae meal in diets for juvenile jian carp (*Cyprinus carpio* var. Jian): Growth performance, antioxidant enzyme activities, digestive enzyme activities, intestine and asatopancreas histological structure. *Aquaculture* 477, 62-70. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2017.04.015>.
- Lim JH, Kim MG, Lim HW, Lee BJ, Lee SH, Hur SW, Kim KW and Lee KJ. 2022. Fish meal replacement with a mixture of plant and animal protein sources in extruded pellet (EP) diet for red seabream *Pagrus major* at low water temperature. *Korean J Fish Aquat Sci* 54, 350-357. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2021.0350>.
- Madibana MJ, Mwanza M, Lewis BR, Fouché CH, Toefy R and Mlambo V. 2020. Black soldier fly larvae meal as a fishmeal substitute in juvenile dusky kob diets: Effect on feed utilization, growth performance, and blood parameters. *Sustainability* 12, 9460. <https://doi.org/10.3390/su12229460>.
- Magalhães R, Sánchez-López A, Leal RS, Martínez-Llorens S, Oliva-Teles A and Peres H. 2017. Black soldier fly (*Hermetia illucens*) pre-pupae meal as a fish meal replacement in diets for European seabass (*Dicentrarchus labrax*). *Aquaculture* 476, 79-85. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2017.04.021>.
- Mashoof S and Criscitiello MF. 2016. Fish immunoglobulins. *Biology* 5, 45. <https://doi.org/10.3390/biology5040045>.
- Ouattara B, Simard RE, Holley RA, Piette GJP and Be'gin A. 1997. Antibacterial activity of selected fatty acids and essential oils against six meat spoilage organisms. *Int J Food Microbiol* 37, 155-162. [https://doi.org/10.1016/S0168-1605\(97\)00070-6](https://doi.org/10.1016/S0168-1605(97)00070-6).
- Rothman JM, Raubenheimer D, Bryer MAH, Takahashi M and Gilbert CC. 2014. Nutritional contributions of insects to primate diets: Implications for primate evolution. *J Hum Evol* 71, 59-69. <https://doi.org/10.1016/j.jhevol.2014.02.016>.
- Rawski M, Mazurkiewicz J, Kierończyk B and Józefiak D.

2020. Black soldier fly full-fat larvae meal as an alternative to fish meal and fish oil in Siberian sturgeon nutrition: The effects on physical properties of the feed, animal growth performance, and feed acceptance and utilization. *Animals* 10, 2119. <https://doi.org/10.3390/ani10112119>.
- Sayramoğlu H, Öztürk RC, Ustaoglu D, Terzi Y, Yandi I, Kayis S, Capkin E and Altinok I. 2023. Effects of black soldier fly meal feeding on rainbow trout gut microbiota, immune-related gene expression, and *Lactococcus petauri* resistance. *J Insects Food Feed* 10, 141-1571-17. <https://doi.org/10.1163/23524588-20230057>.
- Song SH, Lim HW and Lee KJ. 2023. Evaluation of black soldier fly *Hermetia illucens* and mealworm *Tenebrio molitor* as a fish meal substitute in a low-fish meal diet for juvenile olive flounder *Paralichthys olivaceus*. *Korean J Fish Aquat Sci* 56, 861-869. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2023.0861>.
- Takakuwa F, Tanabe R, Nomura S, Inui T, Yamada S, Biswas A and Tanaka H. 2022. Availability of black soldier fly meal as an alternative protein source to fishmeal in red sea bream (*Pagrus major*, Temminck & Schlegel) fingerling diets. *Aquac Res* 53, 36-49. <https://doi.org/10.1111/are.15550>.
- Ushakova NA, Brodskii ES, Kovalenko AA, Bastrakov AI, Kozlova AA and Pavlov DS. 2016. Characteristics of lipid fractions of larvae of the black soldier fly *Hermetia illucens*. *Dolk Biochem Biophys* 468, 209-212. <https://doi.org/10.1134/S1607672916030145>.
- Xiao X, Jin P, Zheng L, Cai M, Yu Z, Yu J and Zhang J. 2018. Effects of black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae meal protein as a fishmeal replacement on the growth and immune index of yellow catfish (*Pelteobagrus fulvidraco*). *Aquac Res* 49, 1569-1577. <https://doi.org/10.1111/are.13611>.